

XIN HAO YU XI TONG

高等学校规划教材

信号与系统

王玉洁 田秀华 杨会玉

单亚锋 南敬昌 编 著

吉林大学出版社

TN911-6
20132

阅 览

信号与系统

王玉洁 田秀华 杨会玉 单亚锋 南敬昌 编著



吉林大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

信号与系统/王玉洁, 田秀华, 杨会玉编著. —长春: 吉林大学出版社, 2012. 9

ISBN 978-7-5601-9149-2

I. ①信… II. ①王… ②田… ③杨… III. ①信号系统
IV. ①TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 234907 号

书 名: 信号与系统

作 者: 王玉洁 田秀华 杨会玉 单亚锋 南敬昌 编著

责任编辑: 陈颂琴 责任校对: 张文涛

吉林大学出版社出版、发行

开本: 787×960 毫米 1/16

印张: 22.75 字数: 430 千字

ISBN 978-7-5601-9149-2

封面设计: 刘 瑜

长春市泽成印刷厂 印刷

2012 年 10 月 第 1 版

2012 年 10 月 第 1 次印刷

定价: 36.80 元

版权所有 翻印必究

社址: 长春市明德路 501 号 邮编: 130021

发行部电话: 0431-89580026/28/29

网址: <http://www.jlup.com.cn>

E-mail: jlup@mail.jlu.edu.cn

内容提要

本书深入浅出而又全面系统地论述了信号与线性系统的基本理论与基本分析方法。全书共八章,内容包括信号与系统的基本概念与分类,连续时间信号与系统的时域分析、频域分析、复频域分析,离散时间信号与系统的时域分析、域分析,连续与离散时间系统的状态变量分析,信号与系统分析的 MATLAB 实现。每章都有大量精选的习题,每章末还都有较全面、概括性的总结。

本书可作为通信、电子和控制类专业本科生的教材,也可供教师、研究生和有关科技人员参考。

前 言

“信号与系统”是通信与电子信息类专业的一门重要的专业基础课,也是国内各院校相应专业的主干课程。它主要研究信号与线性系统的基本理论与基本分析方法,为进一步研究信息处理、通信和控制等理论奠定基础。

我们根据教学改革的需要、学科的发展以及在长期教学科研实践中积累的经验,编著了这本书。本书全面系统地论述了信号与线性系统分析的基本理论和方法。全书共八章,内容包括信号与系统的基本概念与分类,连续时间信号与系统的时域分析、频域分析、复频域分析,离散时间信号与系统的时域分析、域分析,连续与离散时间系统的状态变量分析,信号与系统分析的 MATLAB 实现。每章都有大量精选的习题。每章结束还都有较全面、概括性的小结。

在本书的编著中,我们主要考虑到以下几个方面:

1. 对传统的内容加以精炼地叙述,力图加深各种物理概念的阐述。
2. 结合学科发展,注重理论联系实际。列举出大量应用实例,这不仅可开阔学生的视野,激发学生学习的兴趣,而且通过适当应用可以加深学生对所学基本理论的进一步理解。
3. 增加了在信号与系统分析中应用 MATLAB 软件的内容,编制了许多个程序与习题,使学生对信号与系统分析中的许多重要的概念增加了直观认识,以便加深对概念的理解,并学会应用 MATLAB 软件来快速而有效地分析、解决问题。实践证明,学生通过上机训练,不仅能很快地理解所学的新内容,而且也激发了学生们的学习兴趣,他们对许多概念的理解加深了,而且学会了利用 MATLAB 软件来分析问题的技巧与方法。
4. 在每章中增加许多各种典型的例题,使学生更好地消化课程的基本理论,并掌握分析和解决问题的思路 and 技巧。

本书由辽宁经济职业技术学院王玉洁主编,辽宁工程技术大学田秀华、杨会

玉、单亚锋、南敬昌参编。其中第一章由南敬昌执笔,第二、三章由王玉洁执笔,第四章由单亚锋执笔,第五、六章由田秀华执笔,第七、八章及其他内容由杨会玉执笔。在本书编著过程中,得到了各位同仁的大力支持和热情帮助,在此一并深表谢意。

由于我们的水平有限,书中难免有不当之处,诚恳地欢迎读者批评指正。

作者

2012年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信号传输系统	1
1.2 信号	3
1.3 系统	6
1.4 线性系统分析概述	9
小结	12
习题	13
第 2 章 连续系统的时域分析	15
2.1 引言	15
2.2 微分方程的算子表示法	17
2.3 零输入响应	19
2.4 奇异函数	23
2.5 信号的时域分解	28
2.6 冲激响应与阶跃响应	32
2.7 叠加积分	39
2.8 卷积及其性质	42
2.9 线性系统响应的时域求解	51
2.10 卷积积分的数值计算原理	55
小结	57
习题	58
第 3 章 连续信号与系统的频域分析	63
3.1 引言	63
3.2 信号分解为正交函数	64

3.3 傅里叶级数	67
3.4 周期信号的频谱	76
3.5 非周期信号的频谱	81
3.6 傅里叶变换的性质	91
3.7 连续系统的频域分析法	107
小结	119
习题	119
第4章 连续信号与系统的复频域分析	124
4.1 引言	124
4.2 拉普拉斯变换	125
4.3 拉普拉斯反变换	133
4.4 拉普拉斯变换的基本性质	140
4.5 连续系统的复频域分析法	149
4.6 双边拉普拉斯变换	158
4.7 系统模拟与信号流图	164
4.8 系统函数与系统特性	176
4.9 系统的稳定性	186
小结	194
习题	195
第5章 离散系统的时域分析	201
5.1 引言	201
5.2 抽样定理	204
5.3 离散系统的描述与模拟	210
5.4 离散系统的零输入响应	214
5.5 离散系统的零状态响应	220
5.6 离散系统与连续系统时域分析法的比较	228
小结	229
习题	230
第6章 Z变换与离散系统的z域分析	234
6.1 引言	234

6.2 Z 变换的定义及收敛域	235
6.3 Z 变换的性质	241
6.4 反 Z 变换	246
6.5 Z 变换与拉普拉斯变换的关系	251
6.6 离散系统的 z 域分析法	253
小结	258
习题	259
 第 7 章 系统状态变量分析	263
7.1 引言	263
7.2 状态变量与状态方程	267
7.3 状态方程的建立	275
7.4 连续系统状态方程的解	283
7.5 离散系统状态方程的解	296
7.6 按照状态方程作系统的模拟	299
7.7 状态方程的数值解法	300
7.8 线性系统分析方法综述	308
小结	310
习题	311
 第 8 章 信号与系统 MATLAB 实现	315
8.1 信号的时域分析	315
8.2 线性系统的时域分析	318
8.3 周期信号的频域分析	325
8.4 连续时间信号的频域分析	333
8.5 连续系统的采样与重构	337
8.6 连续系统的复频域分析	338
8.7 离散系统的 Z 域分析	340
 习题参考答案	344
 参考文献	354

第1章 绪论

1.1 信号传输系统

无线电技术已逐步扩大并发展成为现在的通信、雷达、电视、自动控制、计算机、集成电路、生物医学工程、遥感等学科。可以说,上至天文、下至地理,大到宇宙空间、小到核子粒子等的研究,以及从工农业生产,直到社会、家庭生活,没有一处能脱离这些学科的应用。这种发展和应用虽然头绪纷繁,但其中一个主要任务是要解决信息传输的问题,也就是将带有信息的信号,通过某种系统由发送者传送给接收者,并且为了完成这种信息传递的任务,有时需要将信号进行相应的变换和处理。

人们在互相转告某种事件时,是在互相传递着相应的信息。信息要用某种物理方式表达出来,例如可以用语言、文字或图画来表达,还可以用收、发双方事先约定的编码来表达。这些语言、文字、图画、编码等等,分别是按一定规则组织起来因而含有了信息的一组一组的约定的符号,这种用约定方式组成的符号统称为消息。消息一般并不便于直接传输,所以要利用一些转换设备,把各种不同的消息转变成便于传输的电信号。电信号常常是随时间变化的电压或电流等电的量,这种变化是与语言的声音变化或者图画的色光变化等相对应的。这种变化的电压或电流分别构成了代表声音、图画和编码等消息的信号,因而信号中也就包含了消息中所含有的信息。所以,带有消息的信号就是信息传输技术的工作对象。

信号与系统有着十分密切的联系,信号的传输和处理,要由用许多不同功能的单元组织起来的一个复杂系统来完成,另外若离开了信号,系统也就失去了意义。从广泛的意义上说,一切信息的传输过程都可以看成是通信,一切完成信息传输任务的系统都是通信系统,例如电报、电话、电视、雷达、导航等系统均属于。电话是将欲传送的语音转换成与之相对应的电流或电压信号,将它传送到接收端后,利用耳机或扬声器将电信号还原为声音。一个电视系统所要传输的信息包含

在一些配有声音的画面之中,在传输这些画面时,先要利用电视摄像机把画面的光线色彩转变成图像信号,并利用话筒把声音转变成伴音信号,这些就是电视要传输的带有信息的原始信号.然后,把这些信号送入电视发射机,发射机能够产生一种反映上述信号变化的便于传播的高频电信号.最后,由天线将这种高频电信号转换为电磁波发射出去,在空间传播.电视接收者用接收天线截获了电磁波的一小部分能量,把它转变成为高频电信号送入电视接收机.接收机的作用正好和发射机相反,它能从送入的高频电信号中恢复出原来的图像信号与伴音信号,并把这两种信号分别送到显像管和喇叭,使接收者能看到传输的画面,还能听到配有的伴音.因此,通信过程可以用一个简明的方框图来表示,如图 1.1 所示.这个图就是一般通信系统的组成框图,其中转换器指的是把消息转换为电信号或者反过来把电信号还原成消息的装置,如摄像管和显像管、话筒和喇叭等.因为这些装置同时完成了从一种形式的能量转换为另一种形式的能量的工作,所以也常称之为换能器.信道指的是信号传输的通道,信道有无线信道和有线信道两种.通过导线、同轴电缆、光纤等进行传输的,为有线信道,而利用空间进行传输的,为无线信道.如果理解得更加广泛一点,发射机和接收机也可以看成是信号的通道,因此有时也称为信道机.所以,一个通信系统的工作,主要是包括信息到信号的转换、信号的处理和信号的传输.

无线电技术工作的任务,是要保证通过信道传输后的输出信号能够尽量保持输入信号的原来样子或达到某种需要的变换.无线电技术工作者要为完成这样的任务而去研究信号的特性、系统的分析方法、实现系统各组成部分的具体电路以及这些电路对于通过的信号产生何种影响等问题.

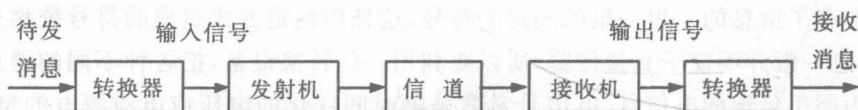


图 1.1 通信系统组成框图

除了通信系统以外,还有其他各种无线电电子学的系统,例如自动控制系统就是其中之一.这些系统的组成与通信系统的组成不一样,但是它们的功能一般仍是信号的处理、传输、比较等等.

由以上简略的叙述可以看出,对于无线电技术工作者,信号和系统的基本分析方法以及它们的基本特性是必须具备的知识,本课程就是为研究这方面的基本理论而设置的,为进一步研究通信理论、控制理论、信号处理、图像处理和信号检测等学科内容奠定必要的基础.

本章下面几节将分别对信号、系统、系统分析等问题进行简单的介绍,以便使广大初学这门课程的学生对此有一初步而概括的理解,后面逐章将进行详细的讨论。

1.2 信号

1. 信号的基本概念

在信号传输系统中,传输的主体是信号,系统所包含的各种电路、设备则是为实施这种传输的各种手段。因此,电路、设备的设计和制造的要求,必然要取决于信号的特性。随着待传输的信号日益复杂,相应地,信号传输系统中的元器件、电路、设备和结构等也日益复杂。这就是信号分析具有重要意义的原因。

广义地说,信号是随着时间变化的某种物理量。只有变化的量中,才可能含有信息。信号可分为光信号、电信号、声信号、……等等。由于电信号具有便于测量、传输、变换与处理等优点,因此非电信号通常总是先转换为电信号再进行处理。电信号是随着时间变化的电的量,通常是电压或电流,在某些情况下,也可以是电荷或磁通。

在数学上,信号可以表示为一个或多个独立变量的函数。例如,语音信号可表示为声音 f 随时间 t 变化的函数,记为 $f(t)$;静止图像信号可表示为亮度(或称灰度) f 随二维空间坐标 x, y 变化的函数,记为 $f(x, y)$;活动图像信号可表示为亮度 f 随二维空间坐标 x, y 和时间 t 变化的函数,记为 $f(x, y, t)$,等等。本书讨论范围仅限于一个独立变量的函数,而且为了方便,以后总以时间表示自变量,尽管在某些具体应用中,自变量不一定是时间。例如,在气象预报中,还关心气压、温度和风速随高度的变化等等。所以,时间函数 $f(t)$ 是本书所讨论信号的数学模型。在信号分析中,信号和函数两个词常相互通用。

信号可以从时间特性和频率特性两方面来描述。信号的时间特性用时间函数(或序列)以及波形图表示,采用时域分析法进行分析;频率特性用频率函数以及频谱图来表示,采用频域分析法进行分析。时域和频域反映了对信号的两个不同的观测面,即两种不同观察和表示信号的方法。信号的时间特性和频率特性具有密切的关系,可以相互转换。

2. 信号的分类

对于信号,可以从几个不同的角度进行分类。

按照 $f(t)$ 是否可以预知,通常把信号分为确定信号和随机信号两大类。当信

号是一确定的时间函数时,给定某一时间值,就可以确定一相应的函数值,这样的信号是确定信号。但是,带有信息的信号往往具有不可预知的不确定性,它们是一种随机信号。随机信号不是一个确定的时间函数,当给定某一时间值时,其函数值并不确定,而只知道此信号取某一数值的概率。严格地说,除了实验室发生的有规律的信号外,一般的信号都是随机的。因为对于接收者来说,信号如果是完全确定了的时间函数,就不可能由它得到任何新的信息,因而也就失去了传输信号的目的。在信号传输过程中,除了人们所需要的带有信息的信号外,同时还会夹杂着如噪声、干扰等人们所不需要的信号,它们大都带有更大的随机性质。但是,对于确定信号的分析仍然具有重要意义,因为有些实际信号与确定信号有相近的特性。例如,乐音在一定时间内近似于周期信号。从这一意义上来说,确定信号是一种近似的、理想化了的信号,作这样的处理,能够使问题分析大为简化,以便于工程上的实际应用。本书只讨论确定信号。

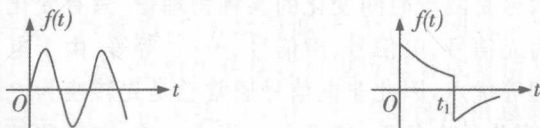


图 1.2 连续信号

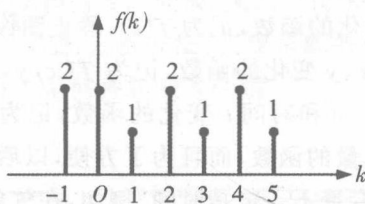


图 1.3 离散信号

按照 $f(t)$ 的自变量 t 是否能连续取值,通常又把信号分为连续时间信号和离散时间信号两类。如果在某一时间间隔内,对于一切时间值,除了若干不连续点外,该函数都给出确定的函数值,这信号就称为连续时间信号,简称为连续信号。需要说明的是,这里“连续”是指函数的定义域——时间——是连续的,至于信号的值域可以是连续的,也可以有不连续的跳跃点。如图 1.2 所示的两个函数都是连续信号。而在一些离散的瞬间才有定义的信号称为离散时间信号,简称离散信号或称为离散序列。同样,这里“离散”是指函数的定义域——时间——是离散的,它只能取某些规定的值。就是说,离散信号是定义在一些离散时刻上的信号 $f(k)$ 。

($k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$), 在其余的时间, 函数没有定义, 如图 1.3 所示. 离散时间信号可以在均匀的时间间隔上给出函数值, 也可以在不均匀的时间间隔上给出函数值, 但一般都采用均匀间隔.

信号的自变量(时间)的取值可以是连续的或离散的, 信号的幅度(函数值)的取值也可以是连续的或离散的. 时间和幅值均为连续的信号常称为模拟信号, 时间和幅值均为离散的信号常称为数字信号. 在实际应用中, 连续信号与模拟信号、离散信号与数字信号常常是相互通用的.

按照 $f(t)$ 是否按一定时间间隔重复, 信号可分为周期信号和非周期信号两类. 周期信号按一定时间间隔重复变化, 而非周期信号的变化则是不重复的. 严格的数学意义的周期信号, 是无始无终地重复着某一变化规律的信号. 当然, 这样的信号实际上是不存在的, 所谓周期信号只是指在较长时间内按照某一规律重复变化的信号.

按照信号的能量或功率为有限值, 信号可分为能量信号和功率信号两类. 对于信号能量或功率特性, 常常研究信号(电流或电压)在一单位电阻上所消耗的能量或功率.

连续信号的能量定义为

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt \quad (1.1)$$

连续信号的功率定义为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |f(t)|^2 dt \quad (1.2)$$

若信号 $f(t)$ 的总能量为有限值而平均功率为零, 即 $0 < E < \infty, P = 0$, 则称其为能量有限信号, 简称为能量信号; 若信号 $f(t)$ 的平均功率为有限值而总能量为无限大, 即 $0 < P < \infty, E = \infty$, 则称其为功率有限信号, 简称为功率信号. 一般地, 周期信号都是功率信号, 而非周期信号则可能出现三种情况: 持续时间有限的非周期信号为能量信号, 如图 1.4(a) 所示的脉冲信号; 持续时间无限、幅度有限的非周期信号为功率信号, 如图 1.4(b) 所示; 持续时间无限、幅度也无限的非周期信号为非功率非能量信号, 如图 1.4(c) 所示的单位斜变信号.

信号还可分为因果信号与非因果信号. 如果一个信号只在自变量的非负半轴左闭区间 $[0, \infty)$ 才取非零值, 而在 $(-\infty, 0)$ 开区间内取值均为 0, 那么这样的信号就称为因果信号, 否则就称为非因果信号.

若当 $t < t_1$ 时, $f(t) = 0$; 当 $t > t_1$ 时, $f(t) \neq 0$, 则 $f(t)$ 为有始信号. 起始时刻为 t_1 , t_1 为实常数. 因果信号为有始信号的特例.

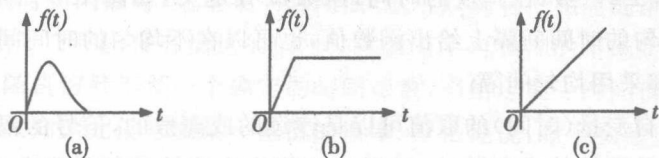


图 1.4 三种非周期信号

1.3 系统

1. 系统的基本概念

所谓系统,当然不限于前面所说的通信系统、自动控制系统,它也包括诸如机械系统、化工系统之类的其他物理系统,还包括像生产管理、交通运输等社会经济方面的系统.从一般的意义上说,系统是一个由若干互有关联的单元组成的并具有某种功能以用来达到某些特定目的的有机整体.例如,它的组成单元可以是一些巨大的机械设备,甚至把参加工作的人也包括进去,这些单元组织成为一个庞大的体系去完成某种极其复杂的任务;简单的组成单元也可以仅仅是一些电阻、电容元件,把它们连结起来成为具有某种简单功能的电路.这些单元及其组成的体系也可以是非物理实体.所以系统的意义十分广泛.

无线电电子学中的系统,常常是各种不同复杂程度的用作信号传输与处理的元件或部件的组合物.通常的概念,一般是把系统看成比电路更为复杂、规模更大的组合.但实际上却很难从复杂程度或规模大小来确切地区分什么是电路,什么是系统,这两者的区别毋宁说是观点上、处理问题的角度上的差别.电路的观点,着重在电路中各支路或回路的电流及各节点的电压上;而系统的观点,则着重在输入输出间的关系或者运算功能上.因此一个 RC 电路也可以认为是一个初级的信号处理系统,它在一定的条件下具有微分或积分的运算功能.在信号传输技术中,一般都是从系统的观点去分析问题的.

系统的功能,可以用图 1.5 的方框图来表示.图中的方框代表某种系统; $e(t)$ 是输入信号的函数,称为激励; $r(t)$ 是输出信号的函数,称为响应.这里所表示的是单输入单输出的系统,复杂的系统可以是多个输入和多个输出.

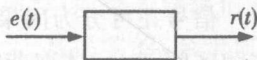


图 1.5 系统的方框图

系统的功能和特性就是通过由怎样的激励产生怎样的响应来体现的.不同的系统具有各种不同的特性.但是实际可以实现的系统,都必须具有共同的因果

性,或者说都必须遵从因果律.一切物理现象,都要满足先有原因然后产生结果这样一个显而易见的因果关系,结果不能早于原因而出现.对于一个系统,激励是原因,响应是结果,响应不可能出现于施加激励之前.所以,响应先于激励的系统是制造不出来的,也就是说在物理上是不可实现的.

2. 系统的特性与分类

系统按其特性可以分为线性系统和非线性系统.一般说,线性系统是由线性元件组成的系统,非线性系统则是含有非线性元件的系统.但是,有的非线性元件的系统在一定的条件下,也可以看成是一线性系统.所以,对于线性系统应该由它的特性来规定其确切的意义.所谓线性系统是同时具有齐次性和叠加性的系统.齐次性表示,当激励改变为原来的 k 倍时,输出响应也相应地改变为原来的 k 倍,这里 k 为任意常数.即如果由激励 $e(t)$ 产生的系统的响应是 $r(t)$,则由激励 $ke(t)$ 产生的该系统的响应是 $kr(t)$. 或者用符号表示为:

若

$$e(t) \rightarrow r(t)$$

则

$$ke(t) \rightarrow kr(t) \quad (1.3)$$

叠加性表示,当有几个激励同时作用于系统上时,系统的总响应等于各个激励分别作用于系统所产生的分量响应之和.如果 $r_1(t)$ 为系统在 $e_1(t)$ 单独作用时的响应, $r_2(t)$ 为同一系统在 $e_2(t)$ 单独作用时的响应,则在激励 $e_1(t) + e_2(t)$ 作用时此系统的响应为 $r_1(t) + r_2(t)$. 或者用符号表示为

若

$$e_1(t) \rightarrow r_1(t), e_2(t) \rightarrow r_2(t)$$

则

$$e_1(t) + e_2(t) \rightarrow r_1(t) + r_2(t) \quad (1.4)$$

在一般情况下,符合叠加条件的系统同时也具有齐次性,电系统就属于这种情况,但也存在并不同时具备齐次性和叠加性的系统.将式(1.3)与式(1.4)合并起来,就可得到线性系统应当具有的特性为

若

$$e_1(t) \rightarrow r_1(t), e_2(t) \rightarrow r_2(t)$$

则

$$k_1 e_1(t) + k_2 e_2(t) \rightarrow k_1 r_1(t) + k_2 r_2(t) \quad (1.5)$$

或者说,具有这种特性的系统,称为线性系统.非线性系统不具有上述特性.

对于初始状态不为零的系统,如将初始状态视为独立于信号源的产生响应的

因素,则运用叠加性,系统的全响应将可分为零输入响应与零状态响应两部分,即

$$r(t) = r_{zi}(t) + r_{zs}(t) \quad (1.6)$$

其中 $r_{zi}(t)$ 为外加激励为零时由初始状态单独作用产生的响应,称为系统的零输入响应; $r_{zs}(t)$ 为初始状态为零时由外加激励单独作用产生的响应,称为系统的零状态响应. 式(1.6)有时也被称为分解性. 如果系统的 $r_{zi}(t)$ 与 $r_{zs}(t)$ 都满足式(1.5)的线性要求,即系统同时具有零输入线性与零状态线性,则该系统仍为线性系统.

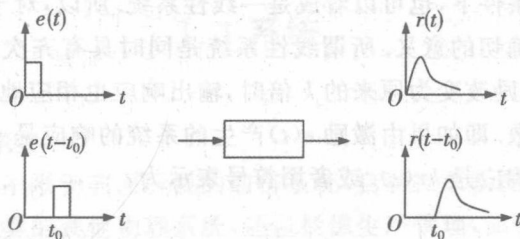


图 1.6 系统的方框图

系统又可根据其中是否包含有随时间变化参数的元件而分为非时变系统和时变系统. 非时变系统又称时不变系统或定常系统, 它的性质不随时间变化, 或者说, 它具有响应的形状不随激励施加的时间不同而改变的特性. 这种系统是由定常参数的元件构成的, 例如通常的电阻、电容元件的参数 R 、 C 等均视为是非时变的. 时变系统中包含有时变元件, 这些元件的参数是时间的函数. 例如, 变容元器件的电容量就是受某种外界因素控制而随时间变化的. 时变系统的参数随时间而变化, 所以它的性质也随时间而变化. 设非时变系统对于激励 $e(t)$ 的响应是 $r(t)$, 则当激励延迟一时间而成为 $e(t-t_0)$ 时, 其响应也延迟一相同时间而形状不变, 成为 $r(t-t_0)$, 如图 1.6 所示. 或者用符号表示为

若

$$e(t) \rightarrow r(t)$$

则

$$e(t-t_0) \rightarrow r(t-t_0) \quad (1.7)$$

式(1.7)是区分系统是否时变的依据, 系统若具有式(1.7)表示的性质则为非时变系统, 不具有上述性质则为时变系统.

系统是否线性和是否时变是两个互不相关的独立概念, 线性系统可以是非时变的或者是时变的, 非线性系统也可以是非时变的或者是时变的. 如果将式(1.5)和式(1.7)加以合并, 可得线性非时变系统的特性为

若